

消波堤被覆ブロックの安定性に及ぼす入射波の 波群効果に関する実験的研究

奥 野 敏 彦*・佐 藤 啓 二**

1. ま え が き

不規則波を受ける消波堤の場合、被覆ブロックは連続した数波の高波 (Wave Grouping 現象) でロッキングを起し被災を受けることが知らされている。Johnson¹⁾らは、高波の連なった波の方がそうでない波よりも被覆ブロックの被害を大きくさせることを報告している。このような現象を与える入射波の波群効果の特性は、被覆ブロックに対する共振現象とともに重要な問題であるが、いまだ明らかにされていない。

本研究は、この点に着目して規則波と波群特性の異なる不規則波を用いて入射波の波群効果と被覆ブロックの安定性との関係を水理実験により検討した。用いた不規則波は、(1) 位相をランダムに与える逆フーリエ変換法による波、(2) 現地波の SIWEH (平滑化した波エネルギーの時間変化曲線) を用いた Funke-Mansard および岩垣・間瀬²⁾のシミュレーション手法による波、の2つである。

実験は、非砕波条件の他、間瀬らの研究結果³⁾より入射波が水深波高比 $h/H_0 < 1.5$ で浅水・砕波変形を受けて、その波群特性の影響が現われなくなることから砕波条件でも実施した。

さらに、本研究では上記2つの不規則波を比較し、この種の実験に対し現地波により近づけた後者の波を用いることの有効性を示すとともに、被覆ブロックの安定性に左右する要因として指摘されている^{4), 5)}、高波の連、砕波や最大波の影響についても検討した。

2. 実験装置および堤体模型

実験に用いた水路は、図-1 のように長さ 35.2 m、深さ 1.0 m、幅 0.7 m の二次元水槽である。水路床には造波板から約 20~30 m 区間に 1/30 勾配の斜面を設けた。図-2 に示す消波堤模型はこの斜面上に設置しテトラポッド模型で2層乱積で被覆した。テトラポッド模型と消波堤模型の諸元を表-1, 2 に示す。

表-1 テトラポッド模型の諸元

空中重量 (gf)	標準偏差 (%)	体 積 (cm ³)	単位体積重量 (gf/cm ³)
118.9	2.29	51.7	2.30

表-2 消波堤模型の諸元

砕波条件	一樣水深部 水深 (cm)	堤体法先水 深 (cm)	積力	空隙率 (%)	法面勾配	ブロック数 (個)
非砕波	60	35	乱積	50	1:4/3	485
砕 波	50	20	〃	〃	〃	318

造波機は、電動油圧サーボ弁式ピストン型である。

波高計は容量式を用い、消波堤設置位置から造波機側 15 m 地点に入・反射波の分離用として No. 1, No. 2 および No. 3 の3本、堤体前にデータ解析用として No. 4 と No. 5 の2本計5本設置した。

3. 実験波の作成およびその特性

実験波の周期または有義波周期は、1.59, 1.81 および

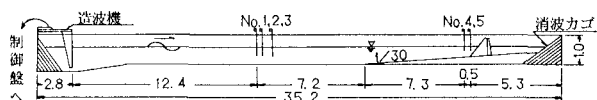


図-1 実験水路 (単位: m)

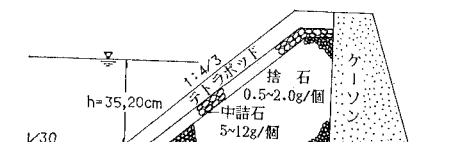


図-2 堤体模型

* 正会員 東北電力(株) 総合研究所

** (株)東北開発コンサルタント

2.44 sec の 3 種類とし、規則波・不規則波を作成した。

不規則波は、Bretschneider-光易型 スペクトルを目的スペクトルとし、逆フーリエ変換法による波 (以下 Case 1 と記す) と、Funke-Mansard および岩垣・間瀬らの手法による波 (以下 Case 2 と記す) を各々 2 種類計 6 波作成した。実験波は、一波群 210 sec の駆動信号を磁気テープに連続 11 回記録した 40 分間の波である。Case 2 に用いた SIWEH は、一連の異常波浪時の現地観測記録の中から波群特性の高い波形を抽出し 1/25 に縮小し求めた。入射波の波群特性は、一義的なパラメーターで評価したいがため、各波形の平均連長 $\overline{J(\bar{H})}$, $\overline{J(H_{1/3})}$, 平均繰返し長さ $\overline{l(\bar{H})}$, $\overline{l(H_{1/3})}$, となり合う波との波高の相関係数 r_1 , SIWEH の変動係数 G.F.²⁾ で総合的に評価した。

堤体設置前の造波実験より、水深 35 cm 地点の実験波の各代表波高間の比および波群特性を表わすパラメーターを表-3 に示す。全体的に Case 2 の方が各値とも大きく、波群特性が卓越していることがわかる。

4. 実験方法

堤体設置後、ブロックが移動しない程度の小さい波を数百波作用してから実験を開始した。その後、所定の実験波を波高の小さい方から順次 5～6 段階に分けて作用させ、その間ブロックの積み直しは行なわなかった。各波高時の移動ブロック個数の測定は、それ以前のものも含めた累計で数えた。この方法で同一実験を 3 回とし、各実験ケースは被害率 10% 程度まで行なった。

実験における被害率 n は、次式で定義した。

$$n = (n_a / N) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 N は有効ブロック数、 n_a は 1 個長分以上移動したブロックの累積数である。有効ブロック数とは、堤体斜面上への入射波の最大遡上高を考慮して決定した検査区間を含むブロック数である。

実験時の入射波高 H_i は、沖側の 3 本の波高計より合田らの入・反射波の分離法を用いて求めた。堤体位置の波高 H_m は、堤体設置前に波高計 No. 1 と No. 5 との波高の相関式を作成しておき実験時の H_i から求めた。

また、実験中は目視観測とビデオ撮影を行なうとともに、波高計 No. 4 の波形をペンオシロに記録しブロック移動時の波群を随時チェックした。

5. 被覆ブロックの安定性

(1) 入射波の波群効果とブロックの移動状況

目視観測によると、ブロックの初期被害は最大波相当の波を含む波群で発生するが、設定波高を上げていくと、被害発生形態は次の 3 つに大別で

表-3 実験波の特性

周期 (sec)	1.59		1.81		2.44	
波 種	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
$H_{max}/H_{1/3}$	1.49	1.60	1.46	1.47	1.59	2.10
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.22	1.22	1.23	1.24	1.30	1.32
$\overline{J(H_{1/3})}$	1.37	1.71	1.30	1.61	1.59	1.74
$\overline{l(H_{1/3})}$	8.68	10.60	7.57	10.33	9.04	13.36
$\overline{J(\bar{H})}$	2.62	2.95	2.39	2.73	2.33	2.81
$\overline{l(\bar{H})}$	5.33	5.74	4.74	5.77	4.96	5.93
r_1	0.372	0.518	0.274	0.480	0.385	0.583
G.F.	0.694	0.722	0.672	0.702	0.791	0.921

* 水深 35 cm 地点のデータ

きる。

- 最大波および 1/10 最大波 1 波による被害
- 有義波高以上の波が 2～3 波連続して作用する 1 つの波群中の個々の波の相互作用による被害
- 高波を含む波群の繰返しによる波群間の相互作用による被害

このうち、b), c) が入射波の波群効果による被害形態と考えられる。

図-3 は、堤体設置前の水深 35 cm 地点で取得した実験波の個々の波ごとの波高波列図の一例である。図中の数値は被害発生率を表わし、各波列位置での被害発生回数と波形全体の総被害発生回数の比率である。これより、最大波や 1/10 最大波を含む小さい波群より有義波以上の波が 3 波、2 波連なった大きい波群の方が被害発生率が高い。また、1/10 最大波 1 波による被害発生率は小さい。この傾向は両不規則波とも共通であり、高波の連なりがブロックの被害を増大させると言える。

図-4 は、非碎波条件時の各代表波高を越える波 (個々の波群内の最大波を示す) を含む波群による累積被害率である。有義波以上の高波を含む波群の被害発生率は 98% であり、このうち最大波を含む波群では 26% ($\overline{J(H_{1/3})}=1.83$)、1/10 最大波を含む波群では 45% (同 1.91) であった。図-3, 4 より、被害はより卓越した高

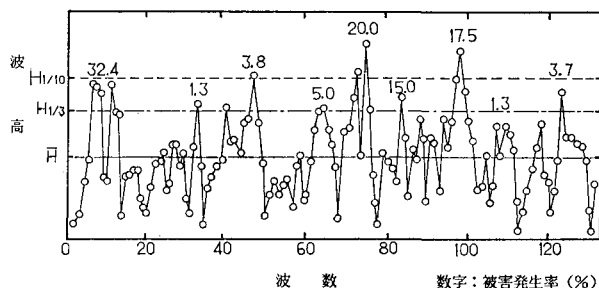


図-3 Case 2 有義波 (周期 1.59 sec) の波高波列図

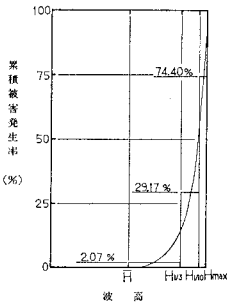


図-4 代表波高と被害発生率の関係

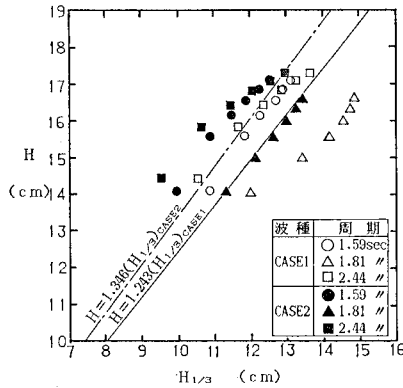


図-5 規則波と不規則波の被害率相当波高の関係(非碎波条件)

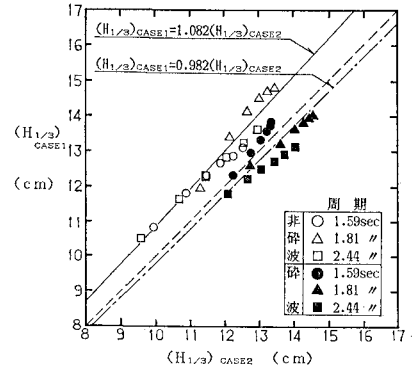


図-6 2種類の不規則波の被害率相当波高の関係

波の連なり位置で発生しやすく、その顕著な波群効果がブロックの不安定化をもたらすと考える。

目視観察結果より、1/10 最大波を越える高波は、ブロック間の噛み合わせを緩め激しいロッキングを起こすが、1 波単独で大きな被害を与えることが少なく、引き続いて有義波高を越える波が2～3波作用した場合に転倒や滑落にまで至り被害に及ぶことが多かった。このことは、入射波の波群効果がブロックの初期被害よりも被害の助長効果に寄与する因子であり、ブロックの安定性に対して高波の連なりによる波の相乗効果を考慮することの重要性を示している。

(2) 被害率と K_D 値

K_D 値は、予備実験の H_i-H_m の相関式を用いて、実験時の入射波高 H_i を堤体設置位置の通過波高 H_m に換算し Hudson 式から求めた。

その結果、非碎波条件時は3周期とも Case 2, Case 1, 規則波の順で K_D 値が大きくなった。被害率(0～1%)の K_D 値は、Case 2 で 5.8～11.9, Case 1 で 7.7～16.0, 規則波で 18.4～26.2 となった。一方、碎波条件時には2種類の不規則波の K_D 値はほぼ等しくなり、Case 2 で 11.7～16.8, Case 1 で 10.2～15.2 となった。このことから、非碎波時は入射波の波群特性の相違が K_D 値に反映されたものの、碎波条件時は両不規則波のその差が現われなくなったため K_D 値が等しくなったものと考えられる。

(3) 実験波の被害率相当波高比の検討

従来の研究では、規則波と不規則波の被害率相当波高比 $(H/H_{1/3})^*$ は、1.2⁶⁾、1.25⁷⁾、1.4⁴⁾ などと報告されている。本実験における規則波と不規則波、2種類の不規則波の被害率(0～5%)相当波高の関係をそれぞれ図-5, 6 に示す。

図-5 より、規則波と Case 1 の $(H/H_{1/3})^*$ は平均して 1.243 で従来の結果とはほぼ一致している。一方、規則

波と Case 2 の場合は 1.346 となり、Case 1 の場合よりも大きい。また、図-6 より非碎波条件時の2種類の不規則波について比較すると、

$$(H_{1/3})_{\text{CASE1}} = 1.082(H_{1/3})_{\text{CASE2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、約 1.1 倍の差があった。また、碎波条件時は、

$$(H_{1/3})_{\text{CASE1}} = 0.982(H_{1/3})_{\text{CASE2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

という関係になり、ほぼ 1 に等しかった。

これより、非碎波条件時で Case 1 の波を用いた場合、異常波浪時の現地波に比べ高波の連なりが少ないため実験上のその再現性が乏しく、被覆ブロックの安定性を過大評価する恐れがある。従って、このような実験を行なう場合、現地波により近づけた Case 2 の波を用いることがより有効であり合理的な設計に反映できると考えられる。

また、非碎波条件の場合、実験波の波群特性と被覆ブ

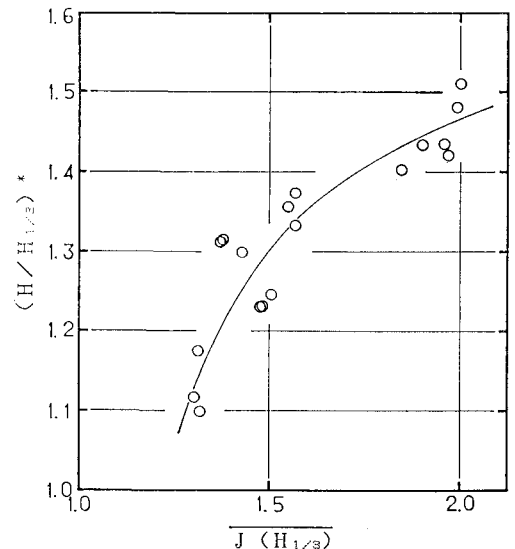
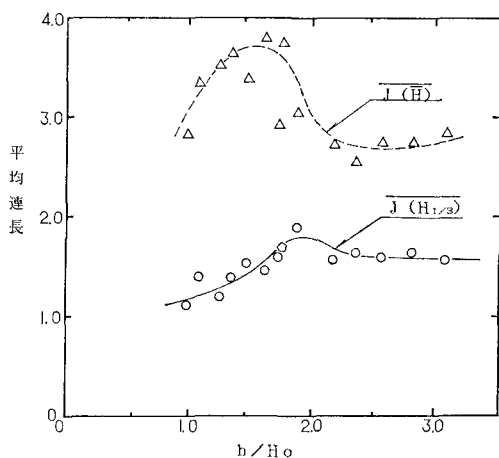


図-7 $(H/H_{1/3})^*$ と平均連長の関係(非碎波条件)

図-8 平均連長の変化 (Case 2, $T_{1/3}=1.81$ s の場合)

ロックの安定性は密接な関係があるため、 $(H/H_{1/3})^*$ が各実験波ごとに変化し一概に一定値で定義することは望ましくないと考える。

そこで、図-7 に非碎波条件時の不規則波の $(H/H_{1/3})^*$ と平均連長 $\overline{J(H_{1/3})}$ との関係を示す。同図には、被害率 (0~2%) の各値をプロットした。これを見ると、 $\overline{J(H_{1/3})}$ に対し $(H/H_{1/3})^*$ は一定値とならず変化することがわかる。実験結果では、

$$(H/H_{1/3})^* = 1.1 \sim 1.5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

の範囲で変動し、従来の結果を包含している。

6. 不規則波の K_D 値と諸特性との関係

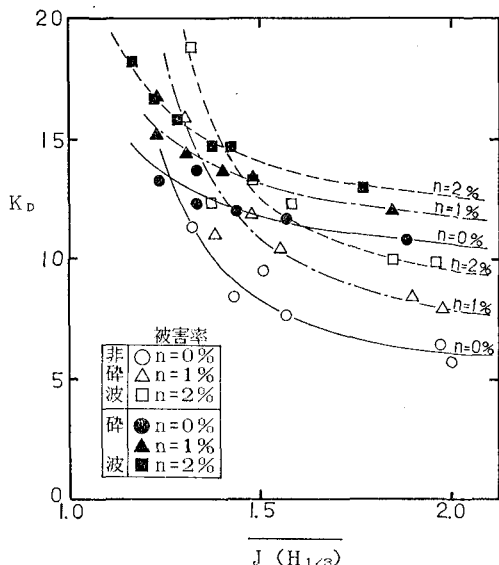
従来の研究より、不規則波による被覆ブロックの安定性を評価する際には高波の連、碎波や最大波の影響をパラメーターとして取り入れる必要があると指摘されているものの、十分な検討は行なわれていない。そこで、実験結果を基に K_D 値とこれらの関係について検討した。

(1) K_D 値と平均連長の関係

図-8 は、平均連長と水深波高比 h/H_0 の関係の一例である。これより、 $h/H_0=1.5 \sim 2.0$ で平均連長のピークが存在し、これより h/H_0 が小さくなると平均連長も低下する。この結果は、間瀬らの報告³⁾ と一致し、入射波が碎波帯内に伝播すると浅水・碎波変形を受けてその波群特性が弱体化することになる。

碎波帯外 ($h/H_0=2.2 \sim 3.4$) と碎波帯内 ($h/H_0=1.2 \sim 1.8$) の実験結果より被害率 0~2% の K_D 値と $\overline{J(H_{1/3})}$ の関係を 図-9 に示す。これより、両者の相関が特に強いことが認められ、 $\overline{J(H_{1/3})}$ が大きいほど K_D 値は減少傾向を示す。

また、 $\overline{J(H_{1/3})} \approx 1.3$ 以下の場合碎波条件時の方が K_D 値は小さくなり、 $\overline{J(H_{1/3})}$ がそれより大きいと非碎波条件時の方が小さくなる。前者は、過大な衝撃力を伴う

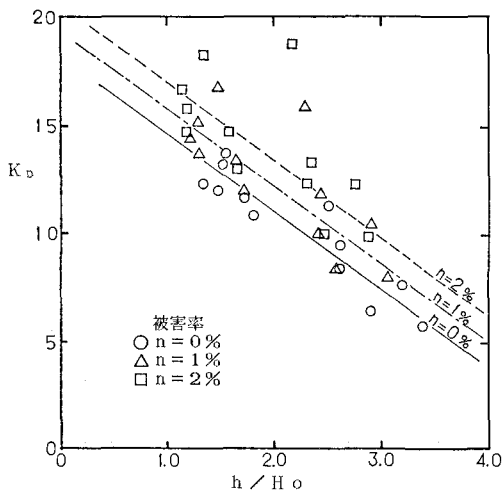
図-9 K_D 値と平均連長の関係

碎波の効果の方が、後者は波の波群効果の方が大きい影響力を持つと言える。これは、被覆ブロックの安定性を左右する支配的要因が $\overline{J(H_{1/3})} \approx 1.3$ を境にして大きく変化することを示している。

さらに、 K_D 値の変動は非碎波条件時の方が大きいことから、被覆ブロックの安定性に対し入射波の波群効果の影響が特に重要であり、消波堤設計に際しても考慮すべき要因であると考えられる。従来まで K_D 値は一定値として用いられてきたが、非碎波条件時では大きく変動するため被覆ブロックの安定性を過小評価する危険性を持っていることになる。

(2) K_D 値と水深波高比の関係

K_D 値と碎波の影響を調べるために、被害率 0~2%

図-10 K_D 値と水深波高比の関係

の K_D 値と h/H_0 の関係を 図-10 に示す。 h は堤体法先水深であり、 H_0 は各被害率相当波高より換算した。これより、両者の間には碎波の有無にかかわらずほぼ反比例の関係があり、 h/H_0 が大きいほど、すなわち堤体設置水深が大きいほど K_D 値は小さくなる。従って h/H_0 も重要なパラメーターと言える。図には若干のバラツキがあるが、これは各入射波の波群特性の相違によるもので、特に $\overline{J(H_{1/3})}$ の大小が顕著な波ほど実験直線からのズレが大きい傾向にある。

(3) K_D 値と最大波の関係

図-11 は、被害率 0~2% の K_D 値と最大波の関係を示す。ここで、 $H_{\max}/H_0$ は造波実験結果と合田の算定図⁹⁾を基に求めた。これより、 $H_{\max}/H_0$ が大きくなると K_D 値が小さくなるが、バラツキは大きい。これは、 $H_{\max}/H_0$ が他の波より小さくても一概に被覆ブロックの安定性が高いとは言いがたく、最大波の影響の他に高波の連や碎波の影響が大きく関与しているためと考えられる。目視観測より、最大波1波単独で作用する場合にはブロックは大きな被害を受けることが少なかったが、実海域では最大波を含む高波の波群として入射することが多いため、最大波近傍の波群効果はブロックの被害の助長効果にも大きな影響力を持つと予想される。従って、 $H_{\max}/H_0$ も被覆ブロックの安定性に対する1つのパラメーターとなり得よう。

7. あとがき

主な結果をまとめると、次のようである。

(1) 入射波の波群効果はブロックの被害助長効果に寄

与する因子である。

(2) 規則波と不規則波の被害率相当波高比 $(H/H_{1/3})^*$ は、平均連長に対し 1.1~1.5 に変化し従来の結果を包含していた。

(3) 被覆ブロックの安定実験では、従来の位相をランダムに与える不規則波よりも、現地波の SIWEH を用いた不規則波による実験がより有効であることがわかった。

(4) 被覆ブロックの安定性は、 $\overline{J(H_{1/3})} \approx 1.3$ を境にしてそれより大きいと入射波の波群効果によって、一方、それ以下の場合は碎波の効果によって支配される。また、非碎波時・碎波時の被覆ブロックの安定性に及ぼすこれらの効果は水深波高比 h/H_0 を介してほぼ線形的に結合される。

(5) 被覆ブロックの安定性を評価するパラメーターとして、 $\overline{J(H_{1/3})}$ 、 h/H_0 、 $H_{\max}/H_0$ が重要であることが明らかにされた。

以上の結果より、消波堤の設計を行なう場合、設計波に対し碎波を受ける地点ではその影響を、碎波を受けない地点では設計波の波群効果を考慮した設計法がより合理的であると考えられる。

なお、本稿の執筆にあたって、東北大学澤本正樹助教授ならびに(財)電力中央研究所我孫子研究所水理部の方々の御指導、御助言を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Jonhson, R. P., E.P.D. Mansard and J. Ploeg: Effects of wave grouping on breakwater stability, Proc. of 16th Conf. on Coastal Eng. ASCE, pp. 2228~2243, 1978.
- 2) 岩垣雄一・間瀬 肇・北 直紀: Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 55~59, 1982.
- 3) 間瀬 肇・松本明男・松元和伸・岩垣雄一: 波群特性が異なる不規則波の浅水・碎波変形特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 169~173, 1986.
- 4) 范 期錦・渡辺 晃・堀川清司: 不規則波に対する消波ブロック被覆堤の安定性に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 352~356, 1983.
- 5) 谷本勝利・大里睦男・高岡征二郎・内田豊彦・池田展男: 不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 343~346, 1979.
- 6) 藤本稔美: 不規則波による消波ブロックの安定性に関する実験的研究, 電力中央研究所報告, No. 385008, 42 p, 1985.
- 7) たとえば, Brousen, M., H. F. Burcharth and T. Larsen: Stability of Dolose slope, Proc. 14th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1691~1701, 1974.
- 8) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 54~67, 1982.

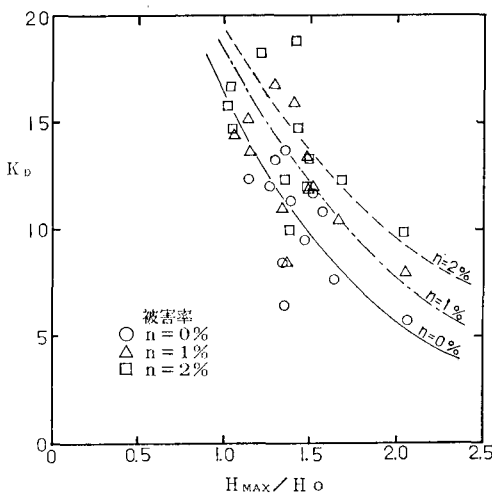


図-11 K_D 値と最大波高の関係